

УДК 621.3

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.11

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ

**Б. О. СТИСЛО**

Кафедра «Промислова і біомедична електроніка» НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА  
email: bohdanstyslo@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Пульсуючий характер потужності, що споживається в мережі електропостачання залізниці є причиною появи пульсацій напруги в контактній мережі. Це призводить до зниження ефективності енергосистеми. Для компенсації пульсацій потужності в мережі електропостачання залізниці пропонується використання гібридних накопичувачів електричної енергії. Запропоновано застосування двоканальних підсилюючих пунктів з відповідною системою управління. В основу математичної моделі покладені дані реальних вимірів.

**Ключевые слова:** електроживлення залізниці; якість електроенергії; БСНЧЕ; двоканальний підсилюючий пункт; розподілена енергетична система; фільтр низьких частот; розділена комутація; балансування акумуляторів; енергоефективність.

## THE FEATURES OF THE USE OF ENERGY STORAGE DEVICES IN THE RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEM

**B. STYSLO**

Industrial and Biomedical department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The pulsating mode of the power consumption in the railroad power supply network is the cause of the occurrence of voltage pulsations in the contact network. This leads to a decrease in the efficiency of the energy system. The purpose of this work is to develop means to improve the quality of the electrical energy of the railroad power supply system and formulate recommendations for their use. To compensate power fluctuations in the electric power supply network of the railway, it is proposed to use hybrid electric energy storage devices. The use of two-channel additional traction power station with an appropriate control system was proposed. The basis of the mathematical model is the data of real measurements. To suppress the power pulsations in the power supply system of the railway, it was proposed to use two-channel additional traction power station. The paper presents DC-DC converter with CF and VF terminals. As a result, dynamic losses are reduced and higher operating frequencies could be achieved. The possibility to transfer power in both directions allows the topology to be applied in high power battery applications. The possibility of using a single low-pass filter for the generation of control signals for both low-frequency and high-frequency channels of system is proven. The use of effective methods of balancing voltage levels in accumulators' stack makes it possible to reduce the power of losses in the converter by 10-15%.

**Keywords:** railway; power quality; BESS; two channel power station; distributed energy system; low-pass filter; separated commutation; cell equalizing; power efficiency.

### Вступ

Підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі можливе за рахунок впровадження в існуючі системи електропостачання батарейних систем накопичення енергії (БСНЧЕ), призначених для компенсації піків споживаного струму, провалів напруги за рахунок повернення раніше запасеної енергії з накопичувача в контактну мережу. Наявність батарейних систем дозволяє здійснювати утилізацію рекуперативної енергії, інтеграцію відновлювальних джерел в наявну мережу електропостачання.

Стрімкий розвиток силової електроніки та поява на ринку нових типів накопичувачів електричної енергії дозволяють створювати сучасні енергоефективні БСНЧЕ з високими динамічними властивостями, що дозволяють покращити якість електричної енергії.

### Мета роботи

На сьогоднішній день широко використовуються морально застарілі системи електроживлення залізниць, які не в змозі забезпечити високу пропускну здатність залізничного транспорту, не відповідають нормам, що висуваються для швидкісних електропоїздів. Як наслідок, відбувається збільшення потужності втрат в контактній мережі, а іноді й виходу з ладу обладнання швидкісних локомотивів. Однією з основних проблем є пікові провали рівня напруги в контактній мережі нижче припустимого рівня – 2700 В (для ділянки швидкісного руху – 2900 В) [1-2].

На рис. 1 наведено результати вимірів рівня напруги на струмоприймачі рухомого складу. Як видно, впродовж достатньо тривалого часу (18% часу руху) спостерігається провали рівня напруги нижче припустимого рівня.

Факт просадки напруги пояснюється пульсуючим характером потужності споживання. Як показано в [4 7], пульсуючий характер потужності призводить до збільшення потужності втрат, і має бути скомпенсованим.

Існують відомі шляхи компенсації пульсацій потужності: установка додаткових трансформаторних підстанцій в місцях найбільшої просадки напруги; підвищення потужності контактної мережі за допомогою додаткового контактної дроту; використання акумуляторних підсилюючих пунктів.

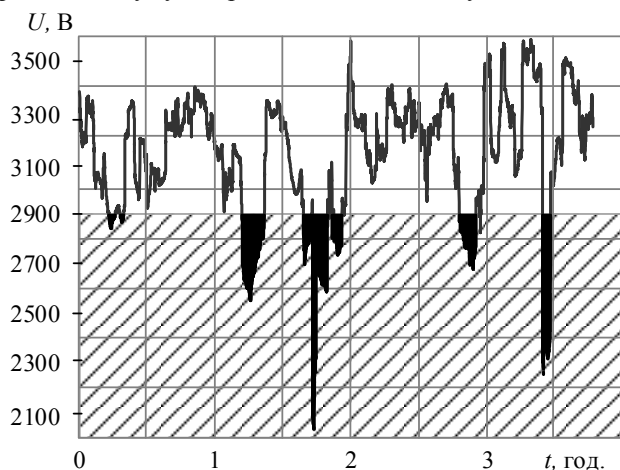


Рис. 1 – Рівень напруги на струмоприймачі

Найбільш раціональним шляхом вирішення проблеми, на думку автора, є застосування додаткових акумуляторних підсилювальних пунктів у місцях найбільш ймовірної просадки напруги: в місцях з інтенсивним рухом вантажних поїздів; в нерівнинній місцевості (прикладом може бути ділянка Львівської залізниці). Використання БСНЕ потребує застосування спеціалізованих перетворювачів.

#### Реалізація поставленої задачі

**Частотні характеристики підсилювального пункту.** Незважаючи на широку номенклатуру акумуляторних накопичувачів електричної енергії, специфіка використання їх в енергетиці накладає досить серйозні обмеження на вибір типу акумулятора: висока енергоємність; термін служби акумуляторної батареї (без обслуговування); відсутність «ефекту пам'яті»; допустимість режимів швидкого заряду батареї; здатність працювати в режимі великих струмових перевантажень; безпека використання; низька вартість. До 2003 р. найпрогресивнішими вважалися літій-іонні акумулятори, що мали найбільш високі енергетичні показники. На сьогоднішній день перевага надається  $LiFePO_4$  акумуляторним батареям, що поєднують в собі всі переваги літій-іонних акумуляторів, є вибухо- і пожегобезпечними, дозволяють здійснювати до

7000 зарядо-розрядних циклів за умови дотримання вимог використання.

Експериментальні дослідження [9] показали, що літій-залізофосфатні акумулятори мають достатньо високі часові характеристики, проте, для компенсації пульсацій потужності в широкому частотному діапазоні з одночасним зменшенням зарядо-розрядних циклів акумуляторів, рекомендовано застосування в складі підсилювальних пунктів двох різних видів накопичувачів: акумуляторів і двошарових електролітичних конденсаторів.

Пропонований метод синтезу гібридного накопичувача ґрунтується на аналізі існуючих статистичних даних струму і напруги контактної мережі в місці підключення до неї споживача. Маючи інформаційний масив вимірювань споживаної нелінійним навантаженням потужності, в спектральному складі струмів можна виділити частотні діапазони ефективної роботи накопичувачів різних типів -  $dF1$ ,  $dF2$  (рис. 2). Очевидно, що отримана спектрограма при досить великій вибірці даних буде адекватно відображати вплив навантаження на контактну мережу на контрольованій ділянці.

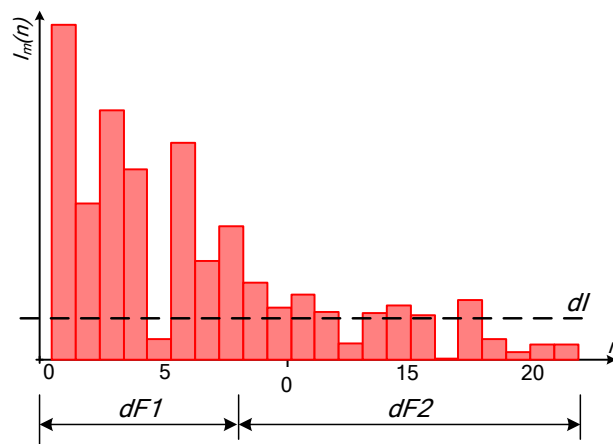


Рис. 2 – До пояснення методики синтезу гібридного накопичувача

Повна ємність гібридного накопичувача визначається інтегральною сумою вибірок споживаного з мережі струму в заданому діапазоні частот. Задаючись в спектрограмі діапазоном частот і мінімально значущою амплітудою гармоніки ( $dI$ ), можна дати оцінку величині енергії, яка має бути прийнята (віддана) конкретним типом накопичувача. Таким чином, процентне співвідношення ємностей кожного з типів накопичувачів визначається як відношення інтегральної суми амплітуд гармонік у всьому частотному діапазоні до інтегральної суми амплітуд гармонік в заданому частотному діапазоні  $dF$ .

**Структурна схема підсилюючого пункту.** Як зазначалося вище, завданням підсилюючого пункту є компенсація втрат в лінії постійного струму і мінімізація амплітуди змінної складової потужності за

рахунок раніше збереженої енергії в електрохімічних накопичувачах електричної енергії. Для ефективного використання гібридного накопичувача доцільне використання кооперативних перетворювачів [11].

На рис. 3 наведено структурну схему підсилюючого пункту, що містить у своєму складі два типи накопичувачів електричної енергії. Кожен з накопичувачів підключено через узгоджуючий перетворювач до контактної мережі. Керування перетворювачами здійснюється від спільної системи керування.

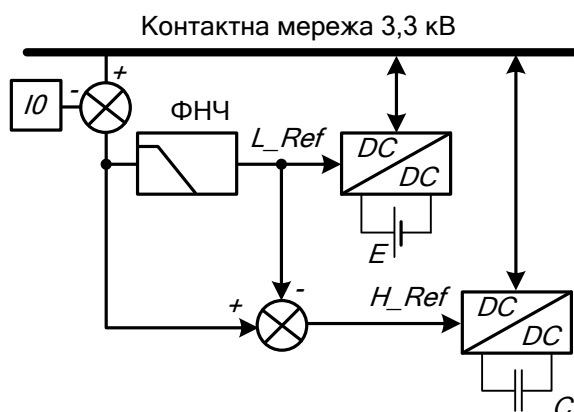


Рис. 3 – Структурна схема реалізації підсилюючих пунктів

Елемент ФНЧ являє собою цифровий фільтр низької частоти. Він призначений для відокремлення низькочастотної складової пульсацій струму і формування сигналу для узгоджуючого перетворювача, що обслуговує низькочастотний канал системи. Джерелом живлення низькочастотного каналу системи є  $\text{LiFePO}_4$  акумулятори. Частотний поділ, насамперед, дозволяє збільшити ресурс акумуляторної батареї за рахунок оптимізації зарядо-розрядних циклів.

Результат алгебраїчного віднімання низькочастотного сигналу завдання із вхідного сигналу використовується у якості сигналу завдання для керування перетворювачем, що обслуговує високочастотний канал. Джерелом живлення високочастотного каналу є двошарові електролітичні конденсатори.

Типовим часом заряд-розряд двошарових конденсаторів є одиниці – десяткі секунд. З огляду на це, частота зрізу ФНЧ приймається рівною 1/60 Гц. Можливе збільшення або зменшення частоти зрізу ФНЧ в достатньо широких границях. Фактично, це призводить лише до збільшення встановленої потужності конкретного типу накопичувача.

Наявність фільтра призводить до появи часового зсуву між сигналами на його вході і виході [10]. Наявність зсуву в сигналі завдання перетворювача по відношенню до низькочастотної змінної складової, яка підлягає фільтрації, породжує

додаткові пульсації, які переходять в високочастотну область і, практично, повністю компенсується перетворювачем високочастотного каналу системи (рис. 3).

Таке рішення дозволяє використовувати ФНЧ досить високого порядку не вносячи додаткові високочастотні спотворення в сигнал, що фільтрується. Оскільки в запропонованій системі використовується регулювання по обуренню, що передбачає пропорційність сигналу завдання перетворювача і його вихідного сигналу, то зі збільшенням порядку фільтра також збільшується встановлена потужність високочастотного каналу системи.

Узгоджуючий перетворювач. Підвищення частоти перетворення супроводжується пропорційним зростанням динамічних втрат силових напівпровідникових ключів силових комутаторів перетворювача. Обмеження динамічних втрат ключів може досягатися шляхом застосування різних видів снаберів. Іншим варіантом зниження комутаційних втрат є використання технології розділеної комутації [12].

Особливості системи електроживлення залізниці (лінія постійного струму 3,3 кВ) обмежують застосування схем на основі DAB (dual-active-bridge converters). В якості узгоджуючого DC/DC перетворювача, що забезпечує зв'язок між накопичувачами електричної енергії та контактною мережею пропонується структура перетворювача, що реалізує алгоритм розділеної комутації (рис. 4).

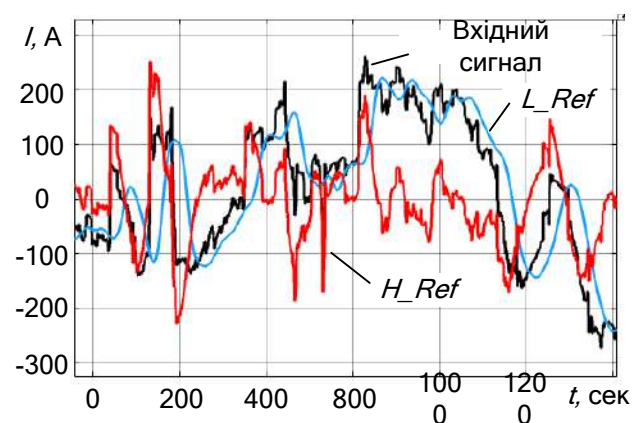


Рис. 4 – Машинограми струмів підсилюючого пункту

Схема складається з двох комутаторів з розділовим трансформатором. Перший комутатор представляє собою мостовий інвертор струму (VT1-VT4), другий - виконаний по топології мостового інвертора напруги (VT7-VT10).

В результаті реалізації запропонованого в [12] алгоритму керування, в кожному з комутаторів відбувається однорідна комутація: вимикання ключів інвертора струму в режимі комутації при нульовому струмі – Zero Current Switching (ZCS) і включення

ключів інвертора напруги в режимі комутації при нульовій напрузі – Zero Voltage Switching (ZVS).

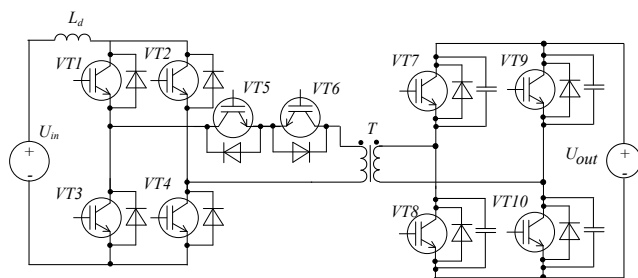


Рис. 5 – Схема узгоджуючого перетворювача

Втрати при примусовому включенні ключів інвертора струму і виключенні ключів інвертора напруги обмежені бездисипативними снаберами. Функцію індуктивного снабера в ланці інвертора струму виконує індуктивність розсіювання розділового трансформатора  $T$ . Такий підхід до побудови схеми дозволяє мінімізувати потужність втрат в силових напівпровідникових ключах.

**Проблеми, що виникають при експлуатації накопичувачів з'єднаних за послідовною схемою.** Максимальні значення напруги на одиничному елементі будь-якого електрохімічного накопичувача електричної енергії є досить малими. Наприклад, для  $LiFePO_4$  максимальне значення напруги складає 3,65 В. Тому, при використанні їх в потужних енергетичних підстанціях одиничні накопичувачі з'єднують в послідовні стеки. При послідовному включенні накопичувачів, процес заряду (розряду) відбувається однаковим значенням струму. Через неминучі відмінності в хімічній структурі накопичувачів, це призводить до значного розкиду значень напруги на кожному з послідовно з'єднаних елементів. Відомо, що правильна експлуатація акумуляторних батарей на основі літію дозволяє збільшити їх ресурс від 2 до 7 тис. зарядо-розрядних циклів. Одним з факторів, що знижують час життя накопичувачів є періодичний вихід за припустимі межі напруги. Для нормального функціонування акумуляторних батарей необхідне застосування спеціалізованих перетворювачів, що вирівнюють значення напруги на послідовно з'єднаних акумуляторах – балансірів. Існують два методи балансування батарей: активний і пасивний. При пасивному балансуванні вся надлишкова енергія батарей з надмірним зарядом розсіюється у вигляді тепла, що, безумовно, є основним недоліком даного методу. Активний метод балансування передбачає передачу енергії від батарей з надлишковим зарядом до менш заряджених батарей. У якості буферних елементів використовуються індуктивності або конденсатори, втрати енергії в яких незначні. Існуючі схеми активних балансірів можна поділити на групи за типом буферного елемента: ємнісні; індуктивні;

трансформаторні (як окремий випадок індуктивних балансірів).

Для порівняння ефективності застосування ємнісного та індуктивного буферного елемента, розглянемо схеми рис. 4, в яких виконується умова  $U_{B2} > U_{B1}$ . Обидві схеми, що наведені на рис. 4 є двотактними. На першому такті роботи (ключ в початковому положенні) енергія від акумулятора  $B_2$  запасється в буферному елементі, на другому такті (ключ перемикається у напрямку стрілки) енергія від буферного елемента надходить до акумулятора  $B_1$ .

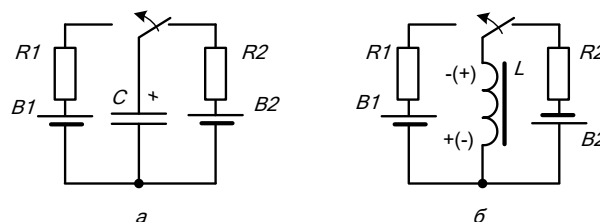


Рис. 6 – До пояснення принципу активного балансування: а – схема на основі ємнісного елемента; б – схема на основі індуктивного елемента.

Проаналізувавши електромагнітні процеси, що протікають в схемах, можна отримати аналітичні вирази, що описують зміну зарядного ( $I_{ch}$ ) та розрядного ( $I_{disch}$ ) струмів в обох схемах. На основі отриманих виразів, визначимо ефективність застосування того чи іншого типів буферних елементів:

$$I_{C\_ch} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R_2}} \cdot (E_2 - E_1)}{R_2} \quad (1)$$

$$I_{C\_disch} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R_1}} \cdot (E_1 - E_2)}{R_1} \quad (2)$$

$$I_{L\_ch} = -\frac{E_2 \cdot e^{-\frac{t \cdot R_2}{L}} - 1}{R_2} \quad (3)$$

$$I_{L\_disch} = i_0 - \frac{\left( e^{-\frac{R_1 t}{L}} - 1 \right) \cdot (E_1 - i_0)}{R_1} \quad (4)$$

Завдавшись параметрами напруги на акумуляторах, ємністю буферного елемента (рис. 6, а) та частотою перетворення, можна визначити діюче значення струму, що протікає в схемі з ємнісним буферним елементом. Якщо завдатися тим самим діючим значенням струму для індуктивного балансира (виконується умова рівності потужності втрат у двох випадках), можна визначити необхідну індуктивність, що забезпечить рівність струмів у двох схемах. Критерієм ефективності будемо вважати

відносну величину енергії  $W^*$ , що передається між акумуляторами  $B2$  і  $B1$  за один такт роботи перетворювача у двох схемах.

$$W^* = W_L / W_C, \quad (5)$$

де  $W_L$  та  $W_C$  – величина енергії, що передається за один такт відповідно індуктивним та ємнісним буферним елементом при однаковому значенні діючого струму.

Виконавши розрахунки для двох акумуляторів з гранично припустимим рівнем розбалансування ( $U_{B2} = 3,65$  В;  $U_{B1} = 2,0$  В), отримуємо значення  $W^* = 7$ . При меншому значенні розбалансування критерій збільшується, і досягає свого максимального значення 1000 при  $U_{B2} \approx U_{B1}$ .

Проведені розрахунки однозначно свідчать про слабку ефективність використання ємнісних буферних елементів у порівнянні з індуктивними в схемах активних балансирів.

**Режими роботи активного балансира з адресною передачею заряду між акумуляторами стека.** Для балансування послідовно з'єднаних акумуляторів рекомендовано використання активного балансира, що дозволяє виконувати балансування будь-якої пари акумуляторів стека [13]. Перетворювач являє собою  $N$  (за кількістю акумуляторів в стеку) зворотньоходових перетворювачів, дросель-трансформатори яких мають спільне осердя (рис. 7). Принцип керування ключами подібний до принципу (рис. 4, б). Інтелектуальна система балансування обраховує ще на початку балансування рівень напруги  $u_{eq}$ , до якого відбувається балансування.

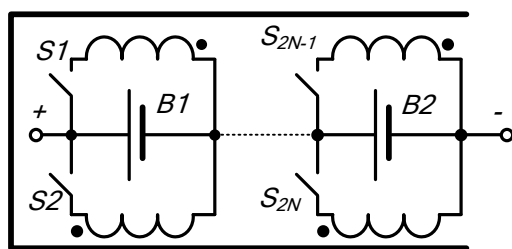


Рис. 7 – Схема активного балансира з адресною передачею заряду (для  $N$  акумуляторів)

Величина  $u_{eq}$  дозволяє визначити які з акумуляторів мають надлишковий запас заряду (є донорами), а які потребують додаткового заряду (є акцепторами) а також завершити процес передачі енергії при досягненні під час балансування на одному з акумуляторів рівня напруги  $u_{eq}$ . На прикладі  $n$  послідовно з'єднаних конденсаторів, значення напруги балансування має бути визначене через величину їх енергій на початку балансування, на підставі припущення, що під час балансування енергія втрат відсутня:

$$u_{eq} = \frac{\sqrt{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}}{n} \quad (6)$$

де  $u_i$  – значення напруги на кожному з накопичувачів на початку процесу балансування.

При балансуванні акумуляторних батарей методика визначення напруги наприкінці балансування залишається тією ж, за винятком визначення енергії акумулятора, що визначається інтегруванням струму через акумулятор.

Система керування BMS реалізує алгоритм прогнозного регулятора, що дозволяє зменшити кількість датчиків в системі, обмежившись лише одним – датчиком напруги на вимірювальній обмотці трансформатора. Всі інші параметри схеми (струм заряду, розряду, рівень розбалансування та величині внутрішній опір кожної батареї) обчислюються цифровою системою керування. Для зменшення потужності статичних втрат в силових ключах схеми використовуються синхронні випрямлячі. Зменшення потужності динамічних втрат досягається специфікою режиму роботи перетворювача – його роботою в режимі гранично-переривчастого магнітного поля – фактично, в режимі нуля струму. Оскільки в процесі балансування змінюються рівні напруги на акумуляторах, які балансуються, то для забезпечення гранично-переривчастого режиму роботи перетворювача коефіцієнт заповнення імпульсів керування силовими ключами  $D$  має визначатися системою керування на кожному такті ШІМ і становить:

$$D = \frac{u_{min}}{u_{min} + u_{max}}, \quad (7)$$

де  $D$  – коефіцієнт заповнення ШІМ;  $u_{min}$ ,  $u_{max}$  – відповідно, значення напруги на акумуляторах, між якими відбувається передача енергії.

Максимальне припустиме значення струму  $I_m$  обмежується індуктивністю  $L$  дросель-трансформатора, і за умови постійного значення періоду ШІМ  $T$ , мінімальне значення індуктивності визначаються за (8):

$$L = \frac{0,5 \cdot T \cdot U}{i_m}, \quad (8)$$

де  $U$  – максимально припустиме значення напруги на акумуляторі;  $T$  – період перетворення ШІМ;  $I_m$  – амплітудне значення струму балансування.

Таким чином, при незмінній частоті перетворення амплітудне значення струму гарантовано буде не більшим за задане в (8), що дозволяє не використовувати в системі індивідуальні датчики струму для кожного з накопичувачів.

**Оптимізація роботи активного балансира з адресною передачею заряду між акумуляторами стека.** Оскільки для кожної можливої пари «донор-

акцептор» значення коефіцієнту заповнення  $D$  різне, має різне значення, відповідно, і діюче значення струму балансування. Це означає, що існують пари «донор-акцептор», при балансуванні яких на поточному кроці буде виділено менше значення потужності втрат  $P_{st}$  в елементах схеми. Цей факт дозволяє виконувати оптимізацію процесу балансування, обираючи кожного разу таку пару, щоб виконувалась умова  $P_{st} = \min$ .

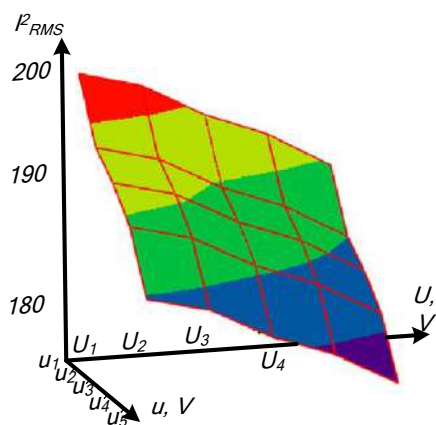


Рис. 8 - Значення величини, що характеризує потужність втрат для різних пар «донор-акцептор»

У якості апарату оптимізації можна доцільно використовувати математичну задачу лінійного програмування про пошук оптимального розподілу однорідних об'єктів між джерелами і споживачами (задача Монжа-Кантаровича). На першому етапі необхідно сформулювати оптимізаційну матрицю, елементами якої є відповідні значення квадрату діючого значення струму, як величини, пропорційної потужності втрат. На кожному етапі балансування необхідно перераховувати елементи матриці та пошук серед них мінімального значення. Кількісною мірою доцільності оптимізації за потужністю втрат  $K_p$  є відношення:

$$K_p = \frac{\max(I_{RMS}^2)}{\min(I_{RMS}^2)}, \quad (9)$$

За наведеною методикою проаналізовано величину  $I_{RMS}^2$  для кожної з 25 можливих пар «донор-акцептор» для десяти послідовно з'єднаних акумуляторів, з рівнем збалансованості 80%. Величина критерію  $K_p$  для даного прикладу становить 1.42, що свідчить про доцільність застосування алгоритму оптимізації процесу балансування (рис. 6)

### Висновки

Для пригнічення пульсацій потужності в системі електропостачання залізниці запропоновано застосування двоканальних підсилюючих пунктів.

Доведено можливість застосування одного ФНЧ для формування сигналів керування як низькочастотним так і високочастотним каналами. Застосування ефективних методів балансування рівнів напруги на одиничних акумуляторах стека дозволяє зменшити потужність втрат в перетворювачі на 10-15%

### Список літератури

1. **Sychenko, V.** Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / **V. Sychenko** // *The archives of transport*. – 2015. – 3. – p. 63-70.
2. **Сиченко, В.** Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму / **В. Сиченко** // *Електро-фікація транспорту*. – 2016. – 11.
3. **Rashid, M. H.** Power electronics handbook: devices, circuits, and applications / **M. H. Rashid**. handbook 3rd. ed. Elsevier Inc., 2011. – 1389 p.
4. Architecture and control of a high energy density buffer for power pulsation decoupling in grid-interfaced applications / **Q. Shibin, L. Yutian, C. Barth, et al.** // *Proc. Of 16th IEEE workshop on Control Model. Power Electron. (COMPEL)*. – 2015. – pp. 1-8.
5. **Neumayr, D.** Ultra Compact Power Pulsation Buffer for Single-Phase DC/AC Converter Systems / **D. Neumayr, D. Bortis, J. W. Kolar** // *Proceedings of the 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016-ECCE Asia)*, May 22-25, 2016, Hefei, China. – 2016.
6. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), 2010, pp. 1-50.
7. **Li, Z.** Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder Systems / **Z. Li, S. Hoshina** // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2016. – V.52. – p. 4218 – 4224. – doi: 10.1109/TIA.2016.2582724.
8. **Fang, J.** A Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for Implementing the Power Management of Virtual Synchronous Generators / **J. Fang, Y. Tang, H. Li, X. Li** // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2017. – Vol.33. – P. 2820 – 2824. – doi: 10.1109/TPEL.2017.2759256.
9. **Sokol, Y.** The specificity of electrical energy storage unit application / **Y. Sokol et al.** // *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. – 2017. – doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524.
10. **Zamaruiev, V. V.** The use of the dirichlet kernel in the control systems of active filters for industrial power line / **V. V. Zamaruiev** // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO). IEEE XXXIII International Scientific Conference*. – 2013. – doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552048.
11. **Romero-Cadaval, E.** Cooperative converters in power electronic systems / **E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero** // *12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn. – 2010. – pp. 51-60. – doi: 10.1109/BEC.2010.5630917.
12. **Ivakhno, V.** Bidirectional isolated ZVS DC-DC converter with auxiliary active switch for high-power energy storage applications / **V. Ivakhno, V. Zamaruiev, B. Styslo** // *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. – 2017. – doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100315.



13. **Сокол, Є., Стисло, Б.** Патент на корисну модель UA 117731U. Активний балансир (10.07.17., Бюл. №13).

#### Bibliography (transliterated)

1. **Sychenko, V.** Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. *The archives of transport*, 2015, **3**, 63-70.
2. **Sychenko, V.** Doslidzhennya rezhymiv naprugi v systemi tyahovoho electropostachnnya postijnoho strumy. *Elektrophickatsiya transportu*, 2016, **11**.
3. **Rashid, M. H.** Power electronics handbook: devices, circuits, and applications. handbook 3rd. ed. Elsevier Inc. 2011, 1389 p.
4. **Shibin, Q., Yutian, L., Barth, C., et al.** Architecture and control of a high energy density buffer for power pulsation decoupling in grid-interfaced applications, *Proc. Of 16th IEEE workshop on Control Model. Power Electron. (COMPEL)*, 2015, 1–8.
5. **Neumayr, D., Bortis, D., Kolar, J. W.** Ultra Compact Power Pulsation Buffer for Single-Phase DC/AC Converter Systems. *Proceedings of the 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016-ECCE Asia)*, May 22-25, 2016, Hefei, China, 2016.
6. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), 2010, 1-50.
7. **Li, Z., Hoshina, S.** Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, **52**, 4218 – 4224, doi: 10.1109/TIA.2016.2582724.
8. **Fang, J., Tang, Y., Li, H., Li, X.** A Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for Implementing the Power Management of Virtual Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, **33**, 2820 – 2824, doi: 10.1109/TPEL.2017.2759256.
9. **Sokol, Y. et al.** The specificity of electrical energy storage unit application. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524.
10. **Zamaruiev, V. V.** The use of the dirichlet kernel in the control systems of active filters for industrial power line. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE XXXIII International Scientific Conference*, 2013, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552048.
11. **Romero-Cadaval, E. and Milanés-Montero, M. I.** Cooperative converters in power electronic systems, *12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn, 2010, 51-60, doi: 10.1109/BEC.2010.5630917.
12. **Ivakhno, V., Zamaruiev, V., Styslo, B.** Bidirectional isolated ZVS DC-DC converter with auxiliary active switch for high-power energy storage applications. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100315.
13. **Sokol, I., Styslo, B.** Aktyvny balansyr. Patent na korysnu model UA 117731U (10.07.17., Bul. №13).

#### Відомості про авторів (About authors)

**Стисло Богдан Олександрович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Промислова і біомедична електроніка»; м. Харків, Україна; e-mail: bohdanstyslo@gmail.com.

**Bohdan Styslo** – Assistant, Department of "Industrail and Biomedical Electronics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: bohdanstyslo@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Стисло, Б. О.** Особливості застосування накопичувачів електричної енергії в системі електропостачання залізниці / **Б. О. Стисло** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 76-82. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.11.

Please cite this article as:

**Styslo, B.** The features of the use of energy storage devices in the railway power supply system. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **9** (1285), 76-82, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Стысло, Б. А.** Особенности использования накопителей электрической энергии в системе электроснабжения железной дороги / **Б. А. Стысло** // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 76-82. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.11.

**АННОТАЦИЯ** Пульсирующий характер потребляемой мощности в сети электроснабжения железной дороги является причиной появления пульсаций напряжения в контактной сети. Это приводит к снижению эффективности энергосистемы. Для компенсации пульсаций мощности в сети электроснабжения железной дороги предлагается использование гибридных накопителей электрической энергии. Предложено применение двухканальных усиливающих пунктов с соответствующей системой управления. В основу математической модели положены данные реальных измерений.

**Ключевые слова:** электроснабжение железной дороги; качество электроэнергии; БСНЭЭ; двухканальный усиливающий пункт; распределенная энергетическая система; фильтр нижних частот; разделенная коммутация; балансировка аккумуляторов; энергоэффективность.

Поступила (received) 9.03.2018